CF2 燃料组件多错对中值下摩擦力与落棒性能试验研究

王运生[1] 肖林海[1] 祝文[1] 卿海杰[1] 聂常华[1] 田雪莲[1] 马新光[1] 史天蛟[1]
1（中国核动力研究设计院反应堆工程研究所 成都 610213）

摘要 CF 系列燃料组件是中核集团自主研发的先进三代核电反应堆核心部件，为分析 CF2 燃料组件在多对中值工况下，驱动线运动部件在水和空气中的摩擦力与落棒性能，采用 1：1 的 CF2 模拟燃料组件配合自主设计研发的可调节旋转式顶盖首次实现了多个错对中值的集成，能够对多个错对中值进行科学准确的调节。获取了驱动线在水和空气两种介质中全行程、多错对中值工况下的摩擦力与落棒性能数据。落棒总时间和棒到缓冲口时间均随着对中值增加而增大，但缓冲时间基本保持一致。燃料组件与控制棒在最大对中值工况下运行良好，摩擦力没有超过允许极限值，也未发生在大对中值工况下的卡棒现象。该研究结果为 CF 系列燃料组件的设计定型、安全评定与软件开发提供了重要的试验依据，其方法可推广至后续 CF3 等燃料组件的科研项目中。

关键词 CF2 燃料组件；落棒性能；摩擦力
中图分类号 TL334

Experimental Study on Friction and Rod Drop Performance of CF2 Fuel Assembly Under Different Eccentricity

Wang Yunsheng[1] Xiao Linhai[1] Zhu Wen[1] Qing Haijie[1] Nie Changhua[1] Tian Xuelian[1] Ma Xinguang[1] Shi Tianjiao[1]
1(*Reactor Engineering Research Institute ,Nuclear Power Institute of China s, Chengdu, 610213, China*)

Abstract **[Background]**: CF series fuel assemblies are the key reactor-core components of the advanced third-generation nuclear power, which are independently developed by China National Nuclear Corporation(CNNC). **[Purpose]**: The purpose is to analyze the friction force and rod drop performance of CF2 fuel assembly combined control rod drive line moving parts in water and air under different eccentricity. **[Methods]**: a 1:1 simulated fuel assembly was used in the test with an independently-developed rotatable top cap. The integration of multiple eccentric was initially implemented for scientific and accurate regulation. **[Results]**: The friction force and rod drop performance data in water and air at different heights and under different eccentric conditions were obtained. The total rod drop time and the time for rod reaching the buffer increased with the increase of eccentricity while the buffer time was basically constant. The fuel assembly and control rod functioned properly under the maximum eccentricity. The friction did not exceed the allowable limit. And no jamming of control rod occurred under large eccentric condition. **[Conclusions]**: The experimental results provide an important experimental basis for the design optimization , safe evaluation and software development of CF fuel assembly. The method can be extended to the subsequent CF3 and other fuel assembly scientific research projects.

Key words CF2 fuel assembly, Rod Drop Performance, Friction

第一作者：王运生，男，1981 年出生，现从事反应堆动力设备特性研究
通讯作者：王运生，E-mail: 38837807@qq.com

引言

CF 系列燃料组件是中核集团自主研发的核电核心部件[1]，其与驱动机构共同构成大型压水堆核电站反应堆的重要组成部分，关系着核反应堆运行的稳定与安全。驱动线有着非常严格的对中要求，以避免驱动机构在运行过程中产生较大摩擦力而导致卡棒现象。因此研制任何一款燃料组件及相关设备都必须经过摩擦力及落棒测试试验，以验证其结构的完整性及其性能[2]。

传统的摩擦力与落棒性能试验只是在一个较小的错对中值下开展，获取摩擦力、落棒曲线等试验数据，无法对多错对中值尤其是较大错对中值下的性能进行分析研究。对驱动机构在水和空气两种介质全行程摩擦力的力学对比分析也未有较多研究。本试验研究为获取空气与静水中多错对中值工况下 CF2 燃料组件力学与运行性能，采用研发设计的试验顶盖进行摩擦力与落棒性能的试验，快速实现了错对中量连续调节，解决了在同一试验顶盖完成多个错对中值的难题，大大的提高了驱动线性能试验的效率，并得到了不同错对中值下空气与静水中的多组性能试验对比分析数据。该顶盖设计已获授权发明专利 1 项[3]，获取的性能对比研究结果对后续 CF3 等系列燃料组件的设计改进、安全评定与软件开发提供了重要的依据。

1 试验本体

1.1 CF2 燃料组件

CF2 型燃料组件由上管座部件、下管座部件、24 根导向管和 1 根仪表管以及连接件构成的骨架上 264 根燃料棒构成。燃料棒按 17×17 方式排列，燃料棒包壳材料采用再结晶 Zr-4 合金包壳材料，具有良好的耐腐蚀与辐照性能；导向管的缓冲结构进行了改进，增加了格架防钩挂结构，尤其对板弹簧结构进行了优化设计。

本次试验采用一组结构尺寸、流体特性与真实组件相同的模拟件开展本项试验，并利用配重相同的金属材料进行模拟。燃料组件安装在堆内构件的围桶方形孔中，下管座位于堆芯下板处，由两个定位销定位，上管座与导向筒通过定位销连接，固定在顶板顶部四边的四组压紧板弹簧提供足够的压紧力，以确保轴向压紧燃料组件，CF2 料组件安装后简图见图 1 所示。

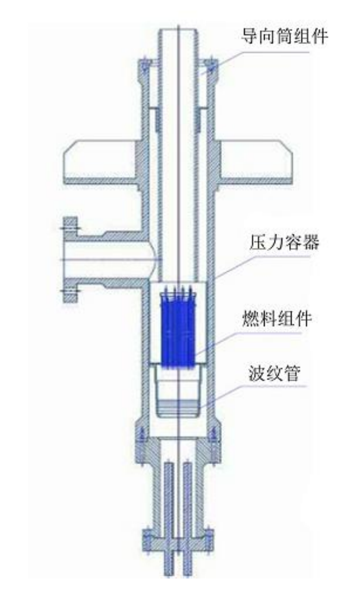


图 1 CF2 燃料组件安装后简图

Fig.1 Summary of CF2 fuel assembly after installation

1.2 可调节旋转顶盖

可调节旋转试验顶盖是燃料组件与驱动线试验的重要部件，其结构示意图见图 2。驱动线穿过试验顶盖一边连接下方控制棒，另一边连接上方的驱动杆，提起或者释放控制棒时，控制棒的运动速度直接决定核反应堆控制的灵敏性，而驱动线与燃料组件之间错对中所导致的摩擦阻力大小是影响该灵敏性的最主要因素，错对中值靠驱动机构管座和上支承板实现。

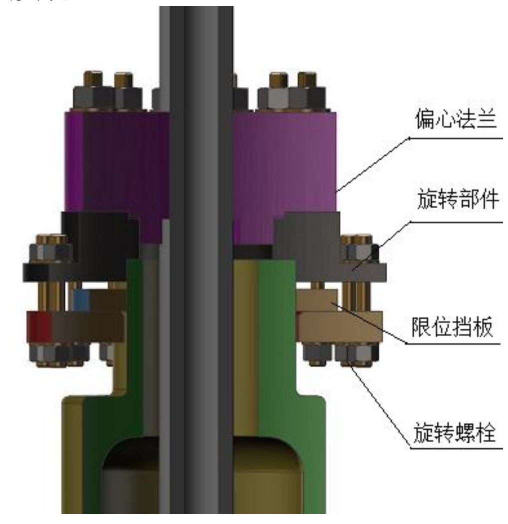


图 2 顶盖结构示意图

Fig.2 Schematic dagram of top cap

新研发旋转顶盖的主要部件包括：密封旋转部件、偏心法兰、旋转螺栓、限位挡板、刻度标尺等，采用密封旋转部件的上、下法兰将驱动线与压力容

器连接。此结构与普通试验顶盖最大的不同是可通过连续旋转法兰的方式实现驱动线与燃料组件的错对中量连续调节。并且特殊的密封结构与高精度刻度标尺可确保在一个试验顶盖上同时实现错对中结果的准确与试验压力的稳定。运用该结构设计，可快速实现错对中量连续调节，大大的提高了驱动线性能试验的效率，为驱动线、核电核动力软件的研发提供了保障。

该试验方法可广泛应用于各类错对中试验，在实现精确对中、缩短试验周期、提高试验效率等方面有着重要意义。

1.3 内部构件

试验用内部构件主要有波纹管组件、分流管组件、吊篮筒组件和压紧筒组件等部分组成。吊篮与压紧筒组件均悬挂于试验压力容器内部的台面之上，并用限位块将其定位与固定。内部构件主要功能是支承和固定导向柱、燃料组件，保持导向柱、燃料组件与驱动机构在堆上的相对位置关系，提供流道，模拟堆上驱动线的环境条件。利用这种方式达到模拟堆上一组驱动线，进行堆外开展摩擦力与落棒试验的目的。

1.4 驱动机构

控制棒驱动机构是一种竖直方向步进的磁力提升机构，它由驱动杆、行程导管、钩爪组件、棒位指示器与隔热套等多种部件组装而成。控制棒驱动机构是安装在反应堆压力容器顶盖上，并与控制棒组件连接。主要功能是将控制棒组件在燃料组件内提升或下插，或将控制棒组件保持在某一高度，或释放控制棒组件，使控制棒组件在自重作用下快速下插。从而完成反应堆启动、功率调节、维持堆功率和安全停堆的功能。此次试验采用国产 B 型驱动机构，全行程设置步数 225 步。

2 试验装置

试验装置包括回路系统、仪表及测控系统、棒电源柜和棒控棒位系统、电气系统等，回路流程图如图 3 所示，回路系统的功能是提供试验所需的环境，并利用垂直起重装置开展摩擦力试验。

仪表及测控系统用于对试验装置运行参数进行监测、控制和试验数据的快速采集，试验测量参数见下表 1。棒电源柜为驱动机构三个工作线圈提供已调节、整定好的循环工作电流；棒控棒位系统使驱动机构实现自动、手动往返运行和落棒动作，并自动记录行进步数。

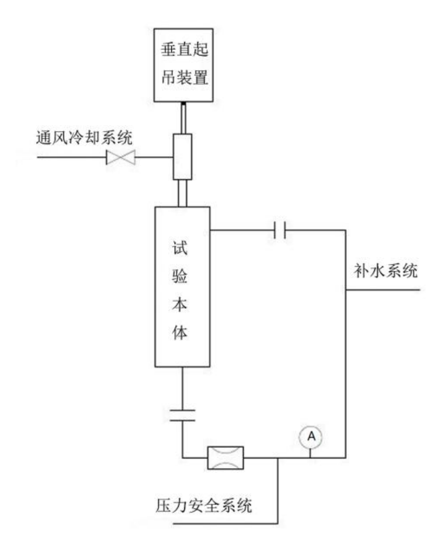


图 3 试验回路流程图

Fig.3 Experiment circuit flow chart

表 1 试验回路测量参数表

Table 1 Parameter list of Experiment circuit

序号 Serial number	参数名称 Parameter name	参数范围 Parameter range	一次表 Original meter
1	Temperature	0～200℃	一体化热电阻 SBWZ
2	Pressure	0～10MPa	EJA
3	Friction	0-1000N	电子测力仪 Dynamometer

3 试验条件

根据控制棒在燃料组件导向管中的运行轨迹和 CF2 型号燃料组件的结构，完成各内部构件配装并给予一定的试验裕量后，在 0~10mm 范围内选取 11 个名义值作为驱动机构控制棒中心线与燃料组件导向管中心线的错对中值 δ。通过对实堆运行工况的分析与总结，为研究控制棒不同高度的摩擦力特性，考虑在静水条件与无水条件下开展控制棒不同轴向高度的错对中摩擦力与落棒性能试验，控制棒总高度为 3571mm，在其高度内选取 12 个点，h_{max} 表示控制棒下落至燃料组件导向管底部，即控制棒的总长度，其参数具体选值见下表 2。

为获取准确的试验数据，利用平均值法测量空气与静水中的摩擦力。每个测点测量至少 10 次，提升驱动杆时至少 10 次，记录驱动杆运动速度；同理测量静水（经过处理后的去离子水）中不同错对中状态下的全高度落棒时间，每种状态也至少进行 10

次落棒试验，各项试验结束后检查试验件的磨损及变形情况，并与试验前的状态进行对比观察。

表 2 不同对中值与高度下摩擦力数据表

Table 2 Friction force under different eccentric and height

δ/mm h/mm	0	δ1	……	δ_{max}=9.4
0（最低位）	F(0，0)	F(δ_1，0)	……	F(δ_{max}，h_1)
h_1	F(0，h_1)	F(δ_1，h_1)	……	F(δ_{max}，h_1)
h_2	F(0，h_2)	F(δ_1，h_2)	……	F(δ_{max}，h_2)
……	……	……	……	……
h_{max}	F(0，h_{max})	F(δ_1，h_{max})	……	F($\delta_{max}h_{max}$)

4 试验结果及分析

在利用上述可旋转试验顶盖及试验装置等部件并且模拟实际堆内构件定位方式前提下，在温度为5℃~40℃、压力为0.1MPa~3MPa、介质为空气/去离子水（静水条件）的工况下首先完成了对中与复对中的工作，复对中结果满足试验要求后完成了空气和静水中 11 个错对中值不同高度的摩擦力试验共 110 次，完成静水中 11 个错对中值全高度落棒共110 次。

4.1 摩擦力与落棒性能研究

运用垂直起重装置在约 0.9m/min 的速度下将驱动杆从最低位提升至最高位置，通过电子测力计进行数据采集并记录整个过程。在空气中控制棒主要受重力和机械摩擦力共同的作用，在水中除受重力外，还受到水中的粘滞阻力和浮力的共同作用，经系统调试后先后在空气和静水中完成不同对中值下的摩擦力试验。

将水注入试验回路与装置内，控制棒与燃料组件等全部没入水中，利用棒控电源柜按照一定的频率提升控制棒至 225 步高度，后切断电源控制棒作自由落体运动，经过导向筒组件与燃料组件导向管最后下落至缓冲段下方缩口处，在此过程中对落棒速度、落棒时间及落棒高度等重要参数进行数据采集。

4.1.1 不同对中工况对摩擦力的影响

图 4 是在环境温度为 22℃的空气中，对中值分别为 4.67 mm、6.0 mm 与 9.4 mm 工况下，把控制棒从 0 位（最低位）匀速提升至 225 步（最高位）的全高度摩擦力数据对比结果。经研究可知：随着棒位的慢慢提升，空气中摩擦力数值逐渐减少，后呈缓慢上升态势，临近最高位附近，摩擦力产生较大上涨的现象。棒位刚开始提升时，控制棒子弹头部分在缓冲段以下，由于缓冲段以下是缩径设计其间隙较小，故而金属间摩擦力比较大，随着提升高度的增加，控制棒进入缓冲段上部间隙较大的区域，摩擦力迅速下降。但控制棒高度继续提升后，留在导向管内的部分倾斜角度逐渐变大并且叠加上方导向管组件内部 C 型槽的影响使得摩擦力逐渐增大。对比三个不同对中值工况下的数据可知：曲线趋势大致相同，对中值较大的情况下摩擦力也相对较大。对中值为 4.67 mm 时，最低位与最高位的摩擦力分别为 26.5 N 与 32.1 N；对中值为 9.4 时，最低位与最高位的摩擦力分别为 37.1N 与 39.2 N。

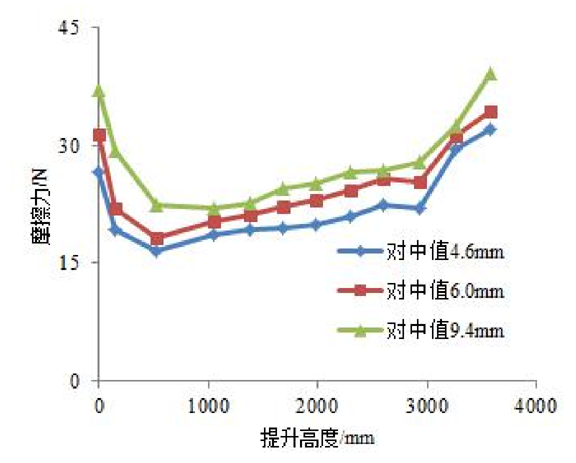


图 4 不同错对中值下空气的中摩擦力

Fig.4 Friction force under different eccentric in air

图 5 是在环境温度为 18℃的静水中，对中值分别为 4.67 mm 与 6.0 mm 与 9.4 mm 工况下，把控制棒从 0 位（最低位）匀速提升至 225 步（最高位）的全高度摩擦力数据对比结果。经研究可知：随着棒位的慢慢提升，静水中摩擦力数值逐渐减少，后呈逐渐稳定的态势，临近最高位附近，摩擦力稍有上涨的现象。棒位刚开始提升时，与空气当中试验一样的原因造成摩擦力比较大，随着提升高度的增加摩擦力迅速下降。控制棒高度继续提升后，由于水在控制棒与导向管的狭小空间内形成液膜，使得留在导向管内的部分控制棒以及上方导向管组件内部 C 型槽对摩擦力的影响减小，故而摩擦力大小比较稳定，在最高位附近时水的相对作用减弱造成摩擦力稍有增大。对比静水中三个不同对中值工况下的数据可知：曲线趋势大致相同，对中值较大的情况下最低位与最高位的摩擦力也较大。在中间高度的位置，对中值大的工况偏移大故而摩擦力也较大，但对中值偏小的工况两者摩擦力大小相差不大，说明在此类工况下水的作用与对中值偏移的作用基本相当。静水中对中值为 4.67 mm 时，最低位与最高

位的摩擦力分别为 54.8 N 与 39.5 N；静水中对中值为 9.4 mm 时，最低位与最高位的摩擦力分别为 62.8 N 与 44.1 N。

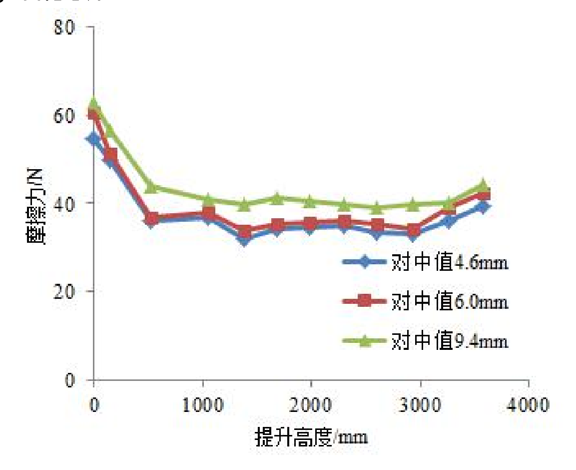


图 5　不同对中值下静水的中摩擦力

Fig.5　Friction force under different eccentric in motionless water

根据流体运动学应力原理，其剪切应力 τ 等于速度梯度与动力粘性系数 μ 的乘积，对比静水和空气中的摩擦力结果发现：由于水的动力粘性系数大于空气，静水中的摩擦力数值在全高度范围内普遍比空气中的要大。但随着控制棒逐渐提升，空气中的摩擦力增加的程度比静水中大的多，空气中的最大值发生在最高位，静水中的最大值则发生在最低位。

4.1.2　不同对中工况对落棒性能的影响

图 6 是在温度为 16℃、压力为 0.3MPa 的静水中，对中值为 4.67mm 的工况下全高度落棒的曲线。观察振动与位移曲线可知在衔铁打开的同时振动的绝对值发生较大的变化且位移在迅速下降，此时控制棒处于加速下降阶段，其速度不断的增加直至控制棒重力与向上的合力平衡，后速度逐渐保持稳定。到达缓冲段附近后速度迅速下降，下落至导向管底部时与底面撞击使得振动数值也发生较大变化，经反复上下振动后最终落入燃料组件导向管底部。

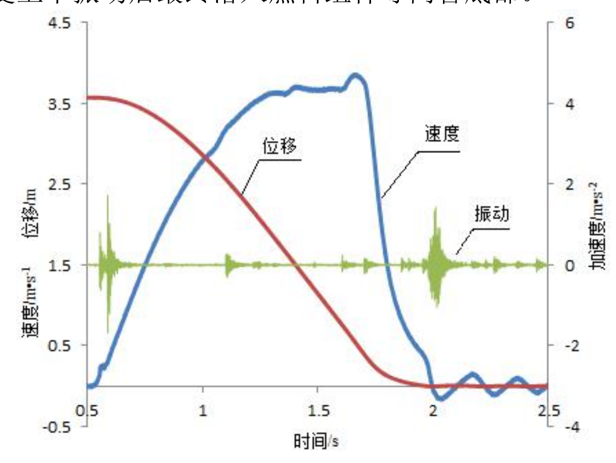


图 6　错对中值为 4.67mm 时静水中落棒曲线

Fig.6　Friction force under eccentric valvue is 4.67mm in motionless water

对比其余 10 个对中值工况下的落棒性能与速度、位移及振动曲线，均与下图 6 所示规律保持一致。选取其中的 4 个名义值对全高度落棒的相关参数进行研究，见下表 4 所示。经研究后可知：随着错对中值的不断增大，棒运行过程中摩擦力也相应增加（见图 4 与图 5），故而最大落棒速度随之逐渐减小，落棒总时间和棒到缓冲口时间均相应的增大；数据显示对中值对缓冲时间的影响非常小，能够基本保持一致，说明缓冲段附近的结构可产生较大摩擦阻力使得棒的速度快速降低，从另外一个侧面印证了图 5 的试验结果，并验证了 CF2 燃料组件设计的合理性。落棒时间的最小值出现在错对中值最小的工况（名义错对中值 0mm），到缓冲口时间为 1.049s，棒落到底时间为 1.477s。落棒时间的最大值出现在错对中值最大的工况（名义错对中值 9.4mm），缓冲时间为 1.183s，棒落到底时间为 1.589s。

表 4　不同对中值工况下落棒特征参数

Table 4　Drop performance under different eccentric

序号 Serial number	错对中值 Eccentricity/mm	最大速度 Maximum speed /m s^{-1}	到缓冲口时间 Time of reaching the buffer port/s	缓冲时间 Buffering time/s	落棒总时间 Total time of droping the rod/s
1	0.00	3.86	1.049	0.428	1.477
2	4.67	3.77	1.065	0.438	1.503
3	6.00	3.71	1.082	0.452	1.534
4	9.40	3.57	1.183	0.406	1.589

5 结论

采用自主设计研发的可密封旋转式试验顶盖快速实现了驱动线与堆内构件对中工作，大大提高试验效率并降低了试验成本；在不同对中值工况下分别开展了摩擦力与落棒性能试验，拓展了该领域的研究范围，获取了多组摩擦力数据与落棒性能曲线并形成对比研究，主要结论如下：

（1）利用自主研发的试验顶盖开展对中工作改变了传统驱动机构对中的方式，在多对中值快速对中方面取得了创新；

（2）开展了全行程、多对中值工况下空气与静水中摩擦力数值对比研究。静水中摩擦力在全行程范围内普遍比空气中的要大，但随着控制棒逐渐提升，空气中摩擦力增加的程度比静水中大；

（3）随着对中值的不断增大，控制棒运行过程中摩擦力也相应增加，落棒总时间和棒到缓冲口时间均相应的增大，但缓冲时间基本保持一致；

（4）通过多次摩擦力与落棒性能试验，燃料组件与控制棒运行良好，摩擦力的大小也没有超过极限值，并未发生最大对中值工况下的卡棒现象，验证了 CF2 燃料组件设计的合理性。

参考文献：

1. 李云,张林,焦拥军,等.华龙一号核电机组燃料组件研发[J]. 2019, 40(S1):24-27
LI Yun, ZHANG Lin, JIAO Jijun, *et al*. Research and development of fuel assemblies for Hualong One nuclear reactor[J]. 2019, **40**(S1):24-27
2. 王继英,许厚明,钟艳敏,等.秦山核电二期工程控制棒驱动线热态综合试验[J].核动力工程, 2003, 24(2):150-154.
WANG Jiying, XU Houming, ZHONG Yanmin, *et al*. Control Rod Drive Line Hot Comprehensive Test for Qinshan Phase Ⅱ NPP Project [J]. Nuclear Power Engineering, 2003, **24**(2):150-154.
3. 肖林海,王运生,马新光,等.一种驱动线错对中测试试验装置及测试方法[P].中国, ZL202010578968.8, 2022.
XIAO Linhai, WANG Yunsheng, MA Xinguang, *et al*. A test device and test method for the eccentric in drive line[P]. China, ZL202010578968.8, 2022.
4. 田雪莲,聂常华,余庆林,等. CF2 系列燃料组件热态冲刷试验研究[J]. 核动力工程, 2017, 38(04):6-10.
TIAN Xuelian, NIE Changhua, YU qinglin, *et al*. Experiment Study on Thermal Erosion of CF2 Series Fuel Assemblies[J]. Nuclear Power Engineering, 2017, **38**(04):6-10.
5. 李浩,夏欣,李燕,等.热态驱动线试验错对中值设定方法研究[J].机械工程师,2019 年第三期:10-12.
LI Hao, XIA Xin, LI Yan, *et al*. Research on Setting Method of Control Rod Drive Line Hot Comprehensive Test Misalignment Value[J]. Mechanical Engineer, 2019, 3: 10-12.
6. 王运生. 采用ML-B型驱动机构与CF燃料组件的控制棒落棒试验研究[R]. 成都：中国核动力研究设计院，2021.
WANG Yunsheng. Experimental study of control rod drop using ML-B drive mechanism and CF fuel assembly[R]. Chengdu: Nuclear Power Institute of China, 2021.